



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Carrera de  
Mecatrónica**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA:** “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UNA ESTRUCTURA BASADA EN EL CONCEPTO DE TENSEGRIDAD PARA UN PROTOTIPO DE ROBOT EXPLORADOR POLIMÓRFICO ADAPTABLE A AMBIENTES FÍSICOS IRREGULARES.”

**AUTOR:** GARCÍA MEJÍA, JONATHAN SEBASTIÁN

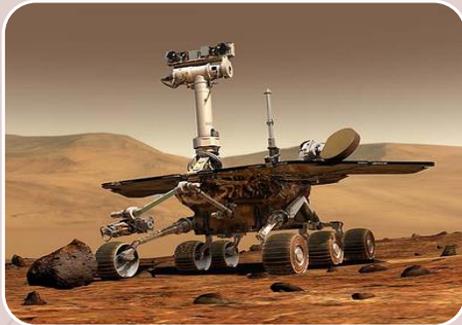
**DIRECTOR:** GORDÓN GARCÉS, ANDRÉS MARCELO



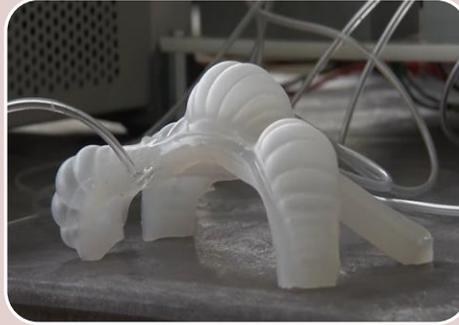
# INTRODUCCIÓN

- Planteamiento del problema
- Justificación e importancia.
- Objetivos
- Hipótesis

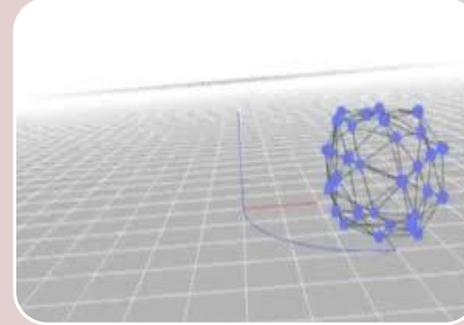
# Planteamiento del Problema



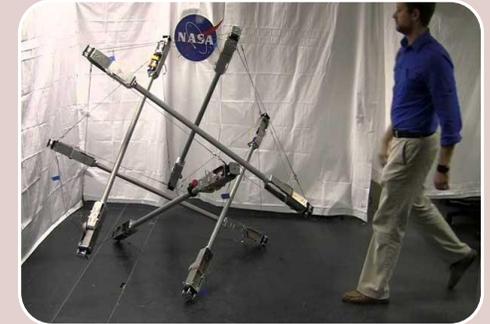
Los robots actualmente se conceptualizan rígidos



Las nuevas tendencias de diseño apuntan hacia los robots flexibles



Los robots exploradores deben adaptarse a terrenos con obstáculos



No existe, en el país, investigaciones sobre los aportes de la tensesgrid en la conceptualización de robots



# Justificación e Importancia



El campo de la robótica  
está en constante  
estado de evolución

Las estructuras  
tensegríticas aportan  
propiedades  
interesantes

Posibles aplicaciones:  
acceso a zonas de  
desastre, la exploración  
de terrenos peligrosos  
(minas, tuberías, etc.)

útil para mantener a la  
vanguardia el desarrollo  
de la robótica en el  
Ecuador.

# Objetivos

## GENERAL

- Diseñar, construir y controlar una estructura tensegrítica con el fin de crear un prototipo de robot explorador polimórfico adaptable a ambientes físicos irregulares.

## ESPECÍFICOS

- Aplicar el concepto de tensegridad en la conceptualización de la estructura.
- Diseñar un mecanismo que sea polimórfico y con capacidad de ser controlado.
- Diseñar, construir y programar el sistema de control responsable del movimiento del mecanismo.
- Someter al mecanismo a pruebas de campo en ambientes controlados.



# Hipótesis

¿El diseño, construcción y control de un robot polimórfico con estructura basada en tensegridad, permitirá su adaptabilidad a ambientes físicos irregulares?

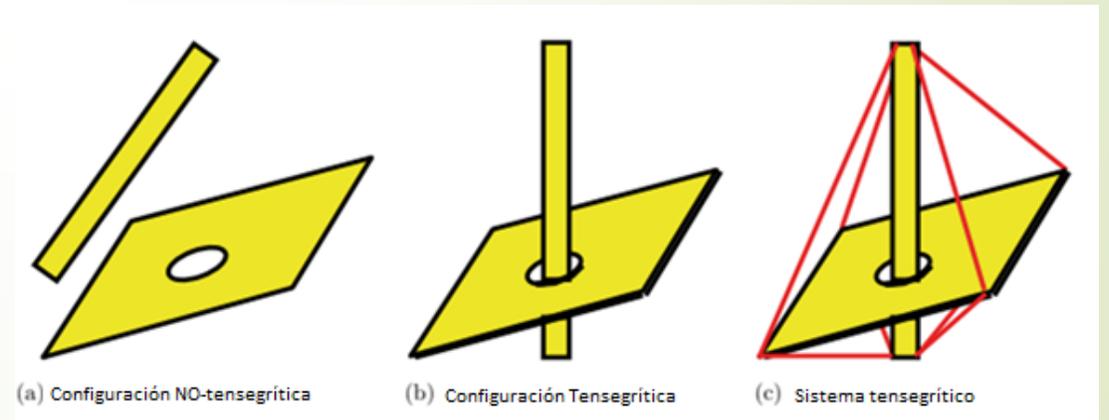
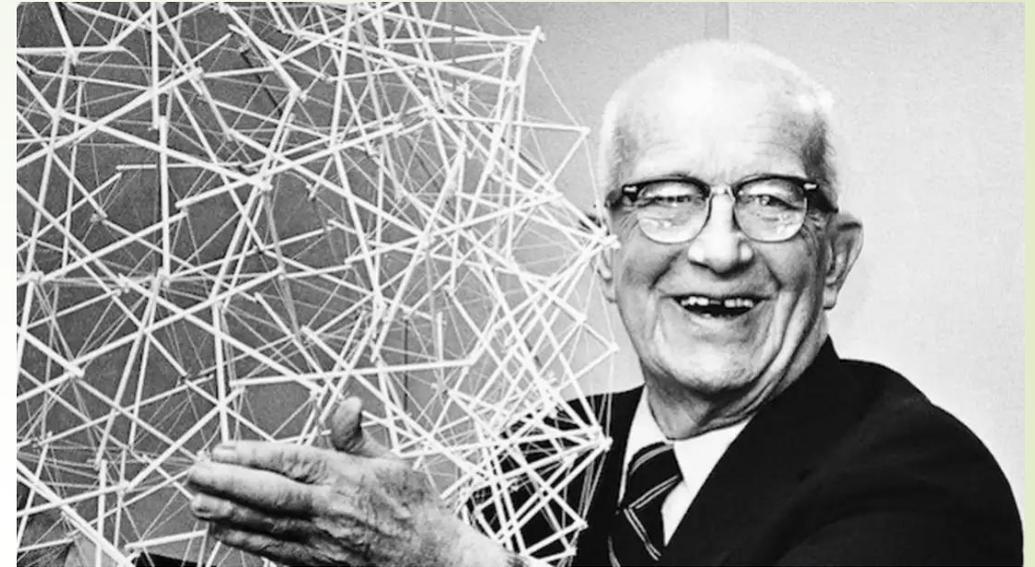


# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

- Conceptualización de Tensegridad
- Componentes de un Sistema Tensegrítico
- Clasificación de los Sistemas Tensegríticos
- Ventajas de la tensegridad
- Antecedentes en la Robótica

# Conceptualización de Tensegridad

- El término proviene de la palabra "Tensegrity"
- Acuñado por el arquitecto Richard Buckminster Fuller
- Es la contracción de "tensional integrity", en español integridad tensional
- Es un paradigma de diseño en el que se alcanza la estabilidad de una estructura mediante el balance de componentes rígidos discontinuos y de elementos elásticos continuos.



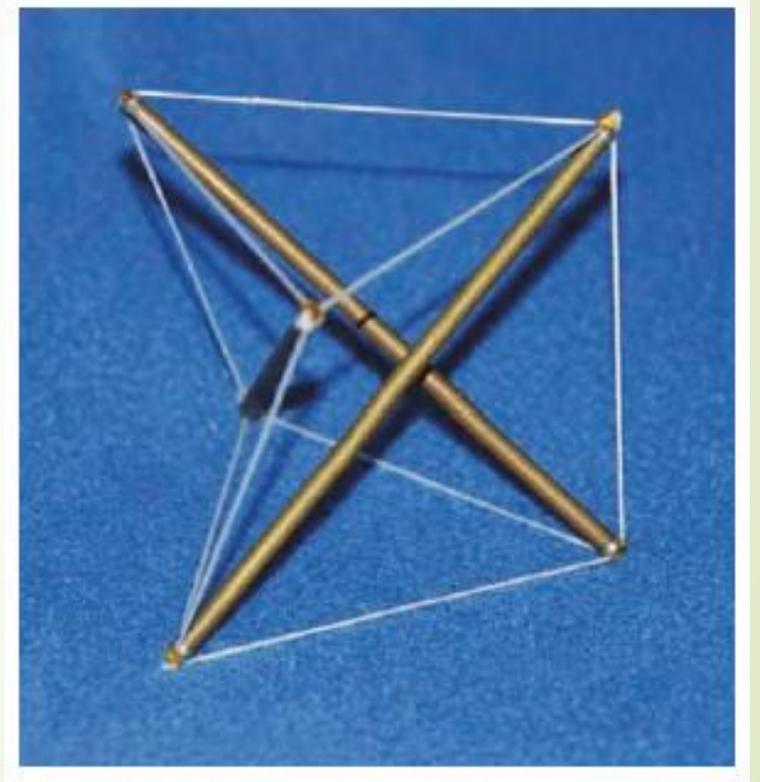
# Componentes de un Sistema Tensegrítico

## Elementos Rígidos

- Discontinuos
- Barras / ejes
- Comprimidos
- Forman un endoesqueleto

## Elementos Elástico

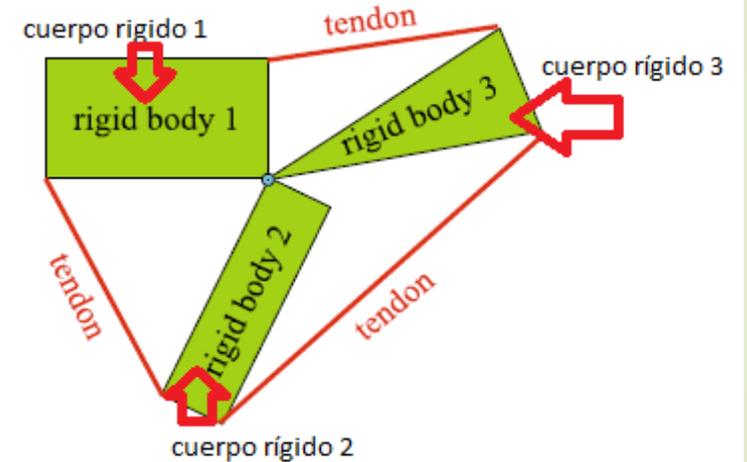
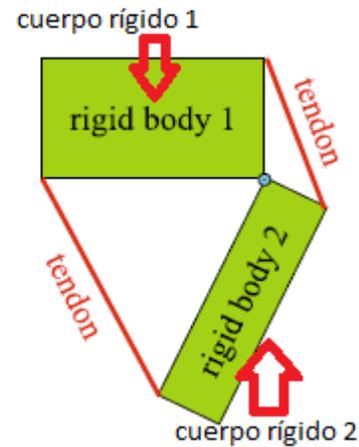
- Continuos
- Elásticos
- Traccionados
- Le dan estabilidad



# Clasificación de los Sistemas Tensegríticos

“Una configuración tensegrítica que no tiene contacto entre sus cuerpos rígidos es un sistema clase 1, y un sistema con k-elementos rígidos en contacto es un sistema de clase k”.

(Skelton & de Oliveira, 2009)





# Ventajas de la tensegridad

## Polimorfismo

- Capacidad de adoptar distintas formas
- Útil para acceso a lugares estrechos

## Plegabilidad

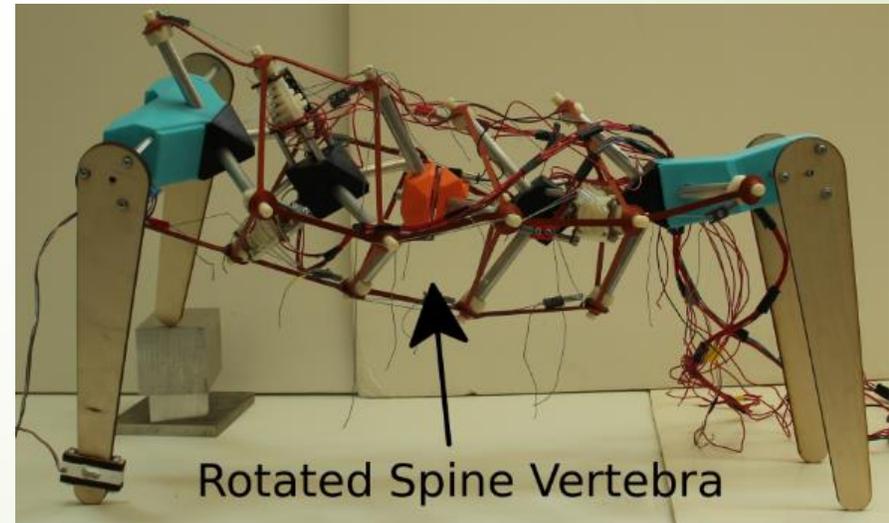
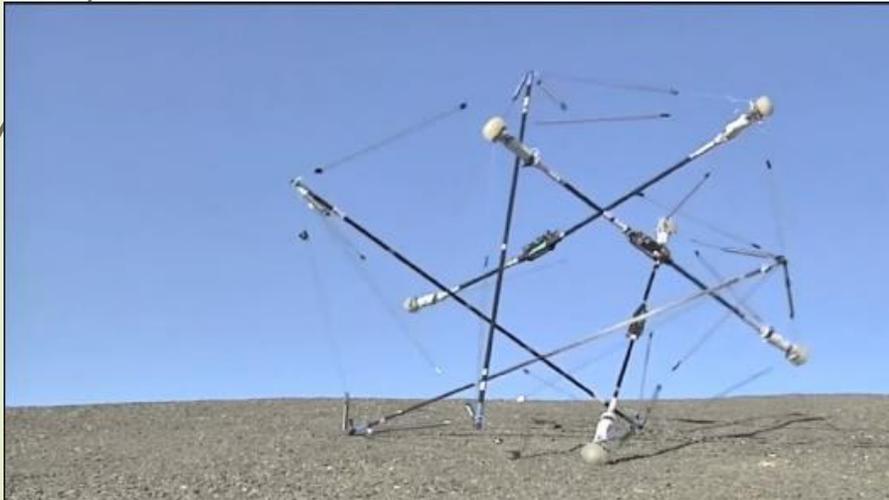
- Capacidad de comprimirse para facilitar su almacenamiento
- Útil para el empaquetado y envío de múltiples exploradores

## Otros

- Bajo peso
- Bajo costo
- Fácil mantenimiento
- Fácil reparación

# Antecedentes en la Robótica

- ▶ Los mayor exponentes son la Universidad de Berkley con sus laboratorios BEST y los laboratorios AMES de la NASA
  - ▶ Desarrolladores del Super Ball bot
  - ▶ Investigaciones sobre robots en forma de espina dorsal





# DISEÑO MECATRÓNICO

- Elementos Mecánicos
- Elementos Electrónicos
- Elementos de Software
- Elementos de Control

## Mecánica

Selección de topología, diseño de los componentes mecánicos para la estructura y sistema de movimiento; análisis estático.

## Electrónica

Selección de Micro-controlador y diseño de circuitos. Referencias principalmente a SuperBall Bot

## Software

Programación del microcontrolador y diseño de app móvil para control remoto

## Control

Implementación de teleoperación via Bluetooth y breve introducción a nuevas tecnologías de control.



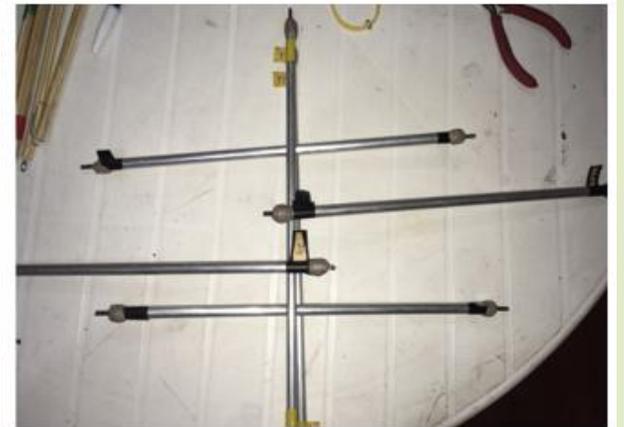
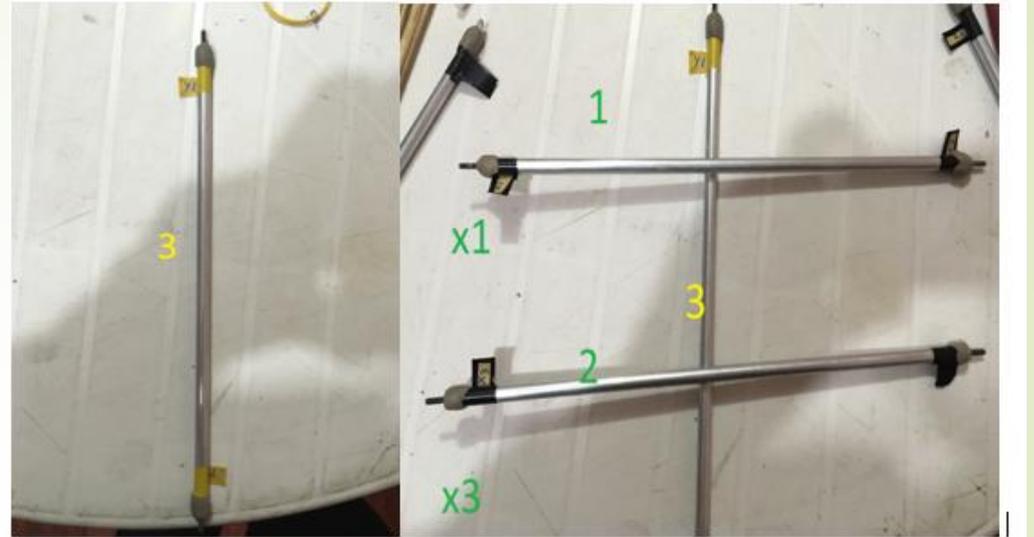
# Diseño Mecánico

Topología

## Topología

- Basado en la estructura del Super Ball Bot
- Estructura tensegrítica Clase 1 de 6 barras
- Estabilizada en un icosaedro regular de caras triangulares
- Su estabilidad fue probada también en el programa NTRT









# Diseño Mecánico

Elementos Elásticos

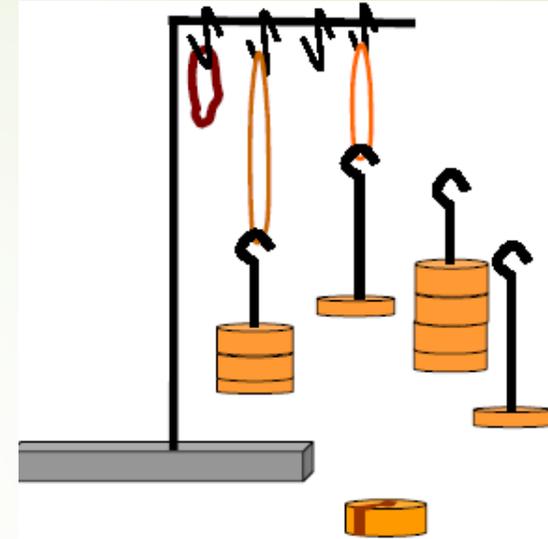
## Elementos Pretensados

- Se componen de cuatro elásticas comunes y doble argollas para facilitar su unión
- Elegidas por su bajo costo y fácil acceso en el medio
- Tienen una buena durabilidad
- Le dan rigidez necesaria para estabilizar la estructura con un valor de tensión bajo según resultado de pruebas 4,3 N
- La tensión baja facilita el diseño del resto de componentes



## Elementos Pretensados

- Sometidos a un experimento básico de tracción se logro determinar la constante elástica del elemento y posteriormente determinar la tensión que ejercen sobre los elementos comprimidos.
- Usando la ley de Hooke y deformidades unitarias de las ligas ya estabilizada la estructura



Constante K(N/m)	K promedio
49	47,39
49,00	
45,26	
46,01	
47,69	

$$F = 47,39 * 0.091 = 4.31 N$$



# Diseño Mecánico

Elementos Comprimidos

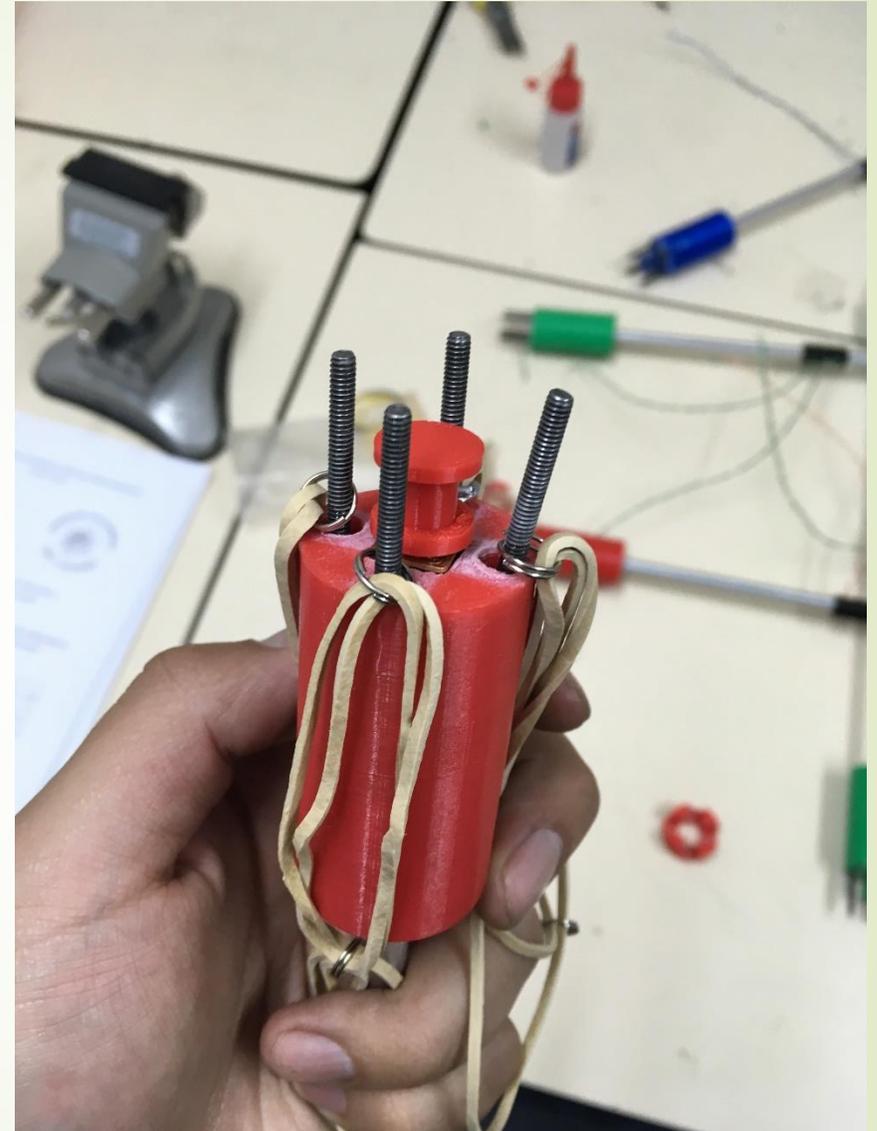


# Diseño Mecánico

Sistema de Posicionamiento Espacial

## Sistema de Posicionamiento Espacial

- Abreviado como S.P.E. es el sistema que permite la variación de las longitudes de los elementos pretensados y así variar la posición del centro de masa del prototipo, causando su rotación
- Se compone de:
  - Revestimiento
  - Bobina
  - Motor
  - Hilo nylon





# Diseño Mecánico

Definición estática mediante la Matriz de Conectividad

## Matriz de Conectividad

- Defina todos los elementos y puntos relevantes de una estructura tensegrítica en función de su centro de gravedad

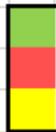
	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8	n9	n10	n11	n12
x	-21	21	-21	21	0	0	0	0	-5	-5	5	5
y	5	5	-5	-5	21	-21	21	-21	0	0	0	0
z	0	0	0	0	5	5	-5	-5	21	-21	21	-21

**Matriz N**

(3x12)

		d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12	d13	d14	d15	d16	d17	d18	d19	d20	d21	d22	d23	d24	d25	d26	d27	d28	d29	d30	
x1	n1	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
x2	n2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
x3	n3	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
x4	n4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	
y1	n5	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	
y2	n6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	
y3	n7	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0
y4	n8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
z1	n9	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z2	n10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z3	n11	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z4	n12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		E. Rígido						E. Elástico																								
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	

(12x30)


 Colores correspondientes a las ligas usadas en la estructura final de la seccion 3,2,1

Matriz Transpuesta de D										
-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Matriz M = NC																															
42	42	0	0	0	0	21	21	16	16	-21	-21	-16	-16	21	21	16	16	-21	-21	-16	-16	-5	5	-5	5	-5	5	-5	5	-5	5
0	0	-42	-42	0	0	16	16	-5	-5	16	16	-5	-5	-16	-16	5	5	-16	-16	5	5	-21	-21	21	21	-21	-21	21	21	-21	-21
0	0	0	0	-42	-42	5	-5	21	-21	5	-5	21	-21	5	-5	21	-21	5	-5	21	-21	16	16	16	16	-16	-16	-16	-16	-16	-16



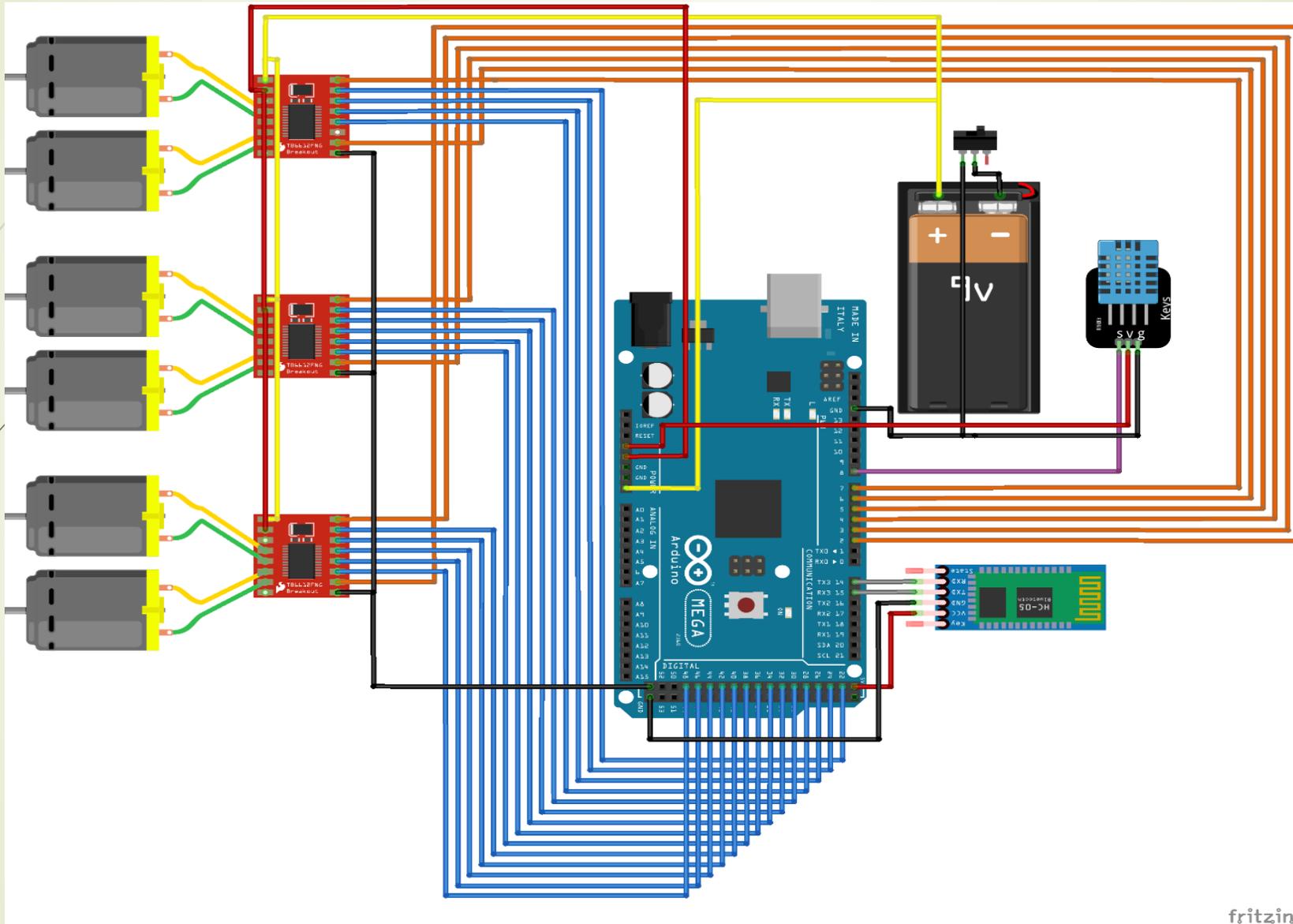
# Diseño Electrónico

Componentes



# Diseño Electrónico

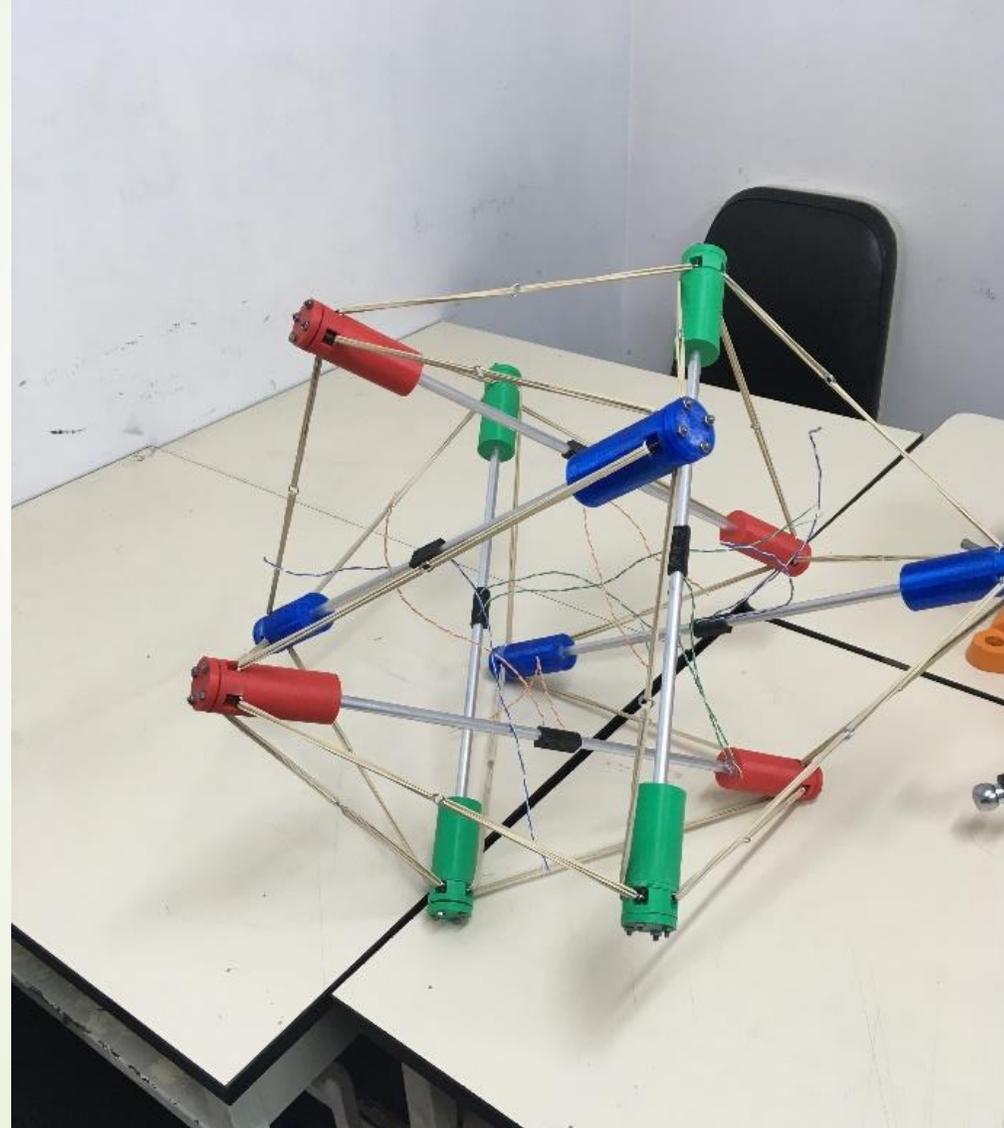
Esquema de Conexiones





# Implementación y Pruebas

# Implementación Final





# Pruebas



# Resultados

No.	Prueba	Se adapta	No se adapta	Total
P1	Cae desde 60 cm y continua funcional	25	0	25
P2	Supera el obstáculo de 1,5 cm de altura	25	0	25
P3	Supera el obstáculo de 3,5 cm de altura	23	2	25
P4	Supera el obstáculo de 5 cm	22	3	25
	Totales	95	5	100

No.	Frecuencia Teórica	
	Exitosa	No Exitosa
P1	23,75	1,25
P2	23,75	1,25
P3	23,75	1,25
P4	23,75	1,25

# Resultados

(f-ft)	(f-ft) <sup>2</sup>	(f-ft) <sup>2</sup> /ft
1,25	1,5625	0,07
1,25	1,5625	0,07
-0,75	0,5625	0,02
-1,75	3,0625	0,13
-1,25	1,5625	1,25
-1,25	1,5625	1,25
0,75	0,5625	0,45
1,75	3,0625	2,45
Chi-cuadrado calculado		5,68

DISTRIBUCION DE  $\chi^2$

Grados de libertad	Probabilidad											
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,01	0,001	
1	0,004	0,02	0,06	0,15	0,46	1,07	1,64	2,71	3,84	6,64	10,83	
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	5,99	9,21	13,82	
3	0,35	0,58	1,01	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	11,34	16,27	
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	13,28	18,47	
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	15,09	20,52	
6	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	16,81	22,46	
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	18,48	24,32	
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	20,09	26,12	
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	21,67	27,88	
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	23,21	29,59	
No significativo									Significativo			



# CONCLUSIONES

- ▶ Se logró diseñar, construir y controlar una estructura basada en el concepto de tensegridad con una topología de seis barras, estabilizada en un icosaedro prácticamente regular de caras triangulares. La estructura en cuestión exhibe las características propias de la tensegridad, principalmente polimorfismo, y le permite adaptarse a la forma y tamaño de distintos obstáculos
- ▶ En función del concepto de tensegridad los materiales empleados en el prototipo son de fácil acceso en el medio local y de muy bajo costo, dándole al robot tensegrítico una ventaja adicional sobre el robot convencional. Los materiales además superan las pruebas necesarias para justificar su uso como se mostró en los datos obtenidos en la sección 3.2



# CONCLUSIONES

- ▶ Empleando el software NTRT (NASA Tensegrity Robot Toolkit) se puede validar la estabilidad de la estructura en el espacio, tal y como se muestra en la sección 3.4.2, el programa NTRT le da un ambiente aproximado al real y brindó la certeza de que la estructura era plausible. En el mismo programa es posible realizar pruebas más avanzadas, sobre todo en el ámbito de la implementación de controladores (no considerados en el presente documento).
- ▶ El diseño e implementación de los S.P.E (Sistema de Posicionamiento Espacial) en los extremos de las barras rígidas, permitió variar el centro de masa del robot, lo cual deriva en la rotación que permite al prototipo tensegrítico moverse.

# CONCLUSIONES

- ▶ De acuerdo con la prueba de chi-cuadrado de la sección 4.3.3 la hipótesis se ha comprobado. Por lo tanto, es posible concluir que una estructura tensegrítica le proporciona a un robot la capacidad de adaptarse a ambientes físicos irregulares que contengan depresiones y obstáculos de distinta clase.
- ▶ El uso de la tensegridad es un concepto innovador y que plantea nuevas posibilidades en la robótica y el prototipo resultante permitirá a que docente y alumnos de la Universidad de las Fuerzas Armadas realicen investigaciones más avanzadas sobre todo en el área de control.